

波動場における水平スリット周辺の流況の可視化と 数値波動水路の適用性

折橋恒春*・加島寛章**・森 信人***・角野昇八****

近年, 閉鎖性海域の水質改善のために種々の海水交換型防波堤が建設されているが, それらの断面形状はいくぶん複雑なこともあり, 海水交換メカニズムが十分解明されているとは言い難い現状にある。著者らは, この海水交換メカニズムの解明のために基本的な形状として水平スリットを有する鉛直平板を対象に Navier-Stokes 方程式に基づく数値計算と水理模型実験による可視化を行い, スリット周辺の流速および乱れエネルギーの空間分布について調べた。数値計算と実験結果の比較から短周期の入射波に対しては両者の結果は良い一致を示したが, 入射波の周期が長くなるに従い数値計算と実験結果の差は大きくなる傾向を示した。

1. 緒 言

港湾では船舶の接岸効率の向上や荷役・保管業務の円滑化, 港内施設の保全を目的に, 防波堤によって港内の静穏度が確保されている。しかしながら, 防波堤は波を抑えるだけでなく外海と港内との海水交換を抑制し, 水質悪化を引き起こす要因ともなっている。近年, 港内などの閉鎖性水域の水質改善を目的とした海水交換型防波堤が重要視され, その建設が増加している (Lee ら, 2003)。一般に海水交換型防波堤は波エネルギーや潮流によって外海と港内の海水交流を維持するものであり, 建設費が安く構造が単純であることが望ましい。

波動運動によって海水交換を行うことを目的とする海水交換型防波堤は, 堤内に設けた遊水部内外の平均水位差を利用して外海から港内へ海水を導入する方式 (例えば山本ら, 1987) と堤体内水平開口部周辺に波動運動によって誘起させられた渦流を利用した方式 (中村ら, 2003) に大別される。前者の方式では, 平均水位差を発生させるために堤体前面に潜堤を設けたり堤内に衝立を設置するなど, 堤体の大型化や構造の複雑化を招く問題がある。一方, 後者の渦流を利用した手法については, 堤体構造が簡素化できるものの開口部で発生する強い流れや乱れ, 開口部周辺の大規模渦が複雑に関連した流況下での問題であるため, 平均流の発生機構について論じられた例も少なく, その最適形状を決定する設計手法が構築されていない。後者の渦流を利用した手法について, 折橋ら (2004) は開口部周辺の渦の発生状況に着目し, 水理模型実験と数値計算を用いて平均流の発生機構について定性的には示しているが, 定量的な評価には至っていない。

一方, 海岸構造物の設計には, 水理模型実験もしくは

数値計算が用いられる。しかしながら, 水理模型実験はフルード則に基づいて実施されるもののスリットなどの開口部によって周辺に引き起こされる渦や乱れはレイノルズ則に従う。このため, 大規模渦が発生するような強い乱れが生じる流れ場を水理模型実験によって定量的に予測することは困難である。また, 数値計算においてもこのような複雑な乱れが発生する流況を再現するモデルが完全に構築されているとは言えない状況である。このため, 数値計算と水理模型実験結果において海水交換量を比較した場合, 定性的な傾向は一致するものの定量的な差異が見られる例も報告されている。(中村ら, 2003; 折橋ら, 2004; Orihashi ら, 2005)

そこで, 本研究では水平スリット付鉛直平板を対象に Navier-Stokes 方程式に基づいた数値計算と水理模型実験による流況の可視化を行い, スリット周辺における流速の時空間特性や乱れ特性を比較することにより, 数値計算の適用性を検討した。

2. 可視化実験の概要

実験には, 図-1 に示す長さ 20 m, 幅 0.5 m, 深さ 0.5 m の 2 次元造波水槽を用い, 図-2 に示すような模型 (アクリル製) を設置した。実験は一様水深 $h = 20$ cm で行い, 表-1 に示すように, H/L が一定となるように, 規則波の波高 H と周期 T を変化させて 4 ケース行った。

可視化実験には, トレーサー粒子としてアルミニウム粒子 ($10\text{--}60\text{ }\mu\text{m}$) を上記の水槽内に混入し, レーザーシート光 (波長: 532 nm, 最大出力: 5 W) を水槽下部から鉛直平板へ照射し, 高速度カメラ (1280×1024 pixel, 最大 2000 frame/s) を 2 台用いて鉛直 2 次元断面の撮影を行った。撮影の条件は, スリットによって誘起される噴流 (以下, スリット噴流と略記) の流速に応じて撮影間隔, シャッター速度をそれぞれ $T = 0.54\text{ s}$ および 0.63 の時には 60 fps ($1/125\text{ s}$), $T = 0.72\text{ s}$ および 0.80 s の時には 125 fps ($1/250\text{ s}$) とした。本計測では十分な画像の空間解像度を確保するため, 鉛直平板の沖側と岸

* 正 会 員 工 修 五洋建設(株)大阪支店
** 学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻
*** 正 会 員 博(工) 大阪市立大学大学院講師 工学研究科都市系専攻
**** フェロー 工博 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻

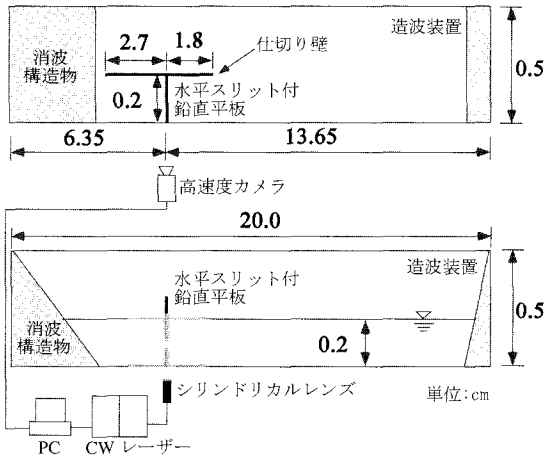


図-1 実験装置の概要

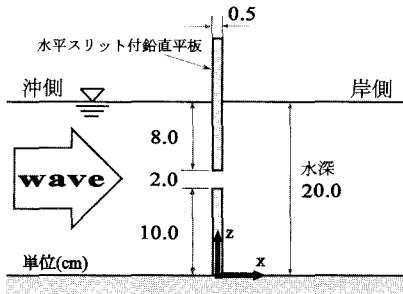


図-2 模型概念図(断面図)

側でそれぞれ別に測定範囲を設定して撮影を行った。なお、撮影範囲は約10 cm × 10 cm、画像解像度は0.8-1.0 mmとした。また、各ケース撮影時間は50周期分とし、可視化画像を位相平均して流速を求めた。

流速の推定には画像相関法を用いた階層的 PIV 法を使用した (Mori ら, 2003)。初期の64 × 64 pixel の検査領域から最終的に、8 × 8 pixel まで再帰的処理を行った。誤ベクトルの除去には、メディアンフィルター法を使用し、失われたベクトル情報は、Kriging 法によって補間した。

3. 数値計算の概要

本研究では、2次元非圧縮性粘性流体に対する連続式と Reynolds 平均型 Navier-Stokes 方程式を基礎式とし、乱流モデルに高 Reynolds 型 $k-\epsilon$ モデルを、自由表面解析モデルに VOF 法を採用した数値波動水路 (CAD-MAS-SURF, 2001) を用いて計算を行った。数値計算は、図-3 に示す鉛直2次元断面を対象とし、空間格子間隔は水平方向 $\Delta x = 0.5-1.0$ cm として鉛直平板周辺で密にして、鉛直方向 $\Delta z = 0.2-0.5$ cm とし水面付近で密にした。両端の境界条件は Sommerfeld の放射境界条

表-1 入射波条件

Case	周期 T (s)	波長 L (m)	波速 c (m/s)	波高 H (cm)	波形勾配 H/L
1	0.54	0.45	0.83	0.45	0.01
2	0.63	0.59	0.94	0.59	0.01
3	0.72	0.75	1.04	0.75	0.01
4	0.80	0.90	1.13	0.90	0.01

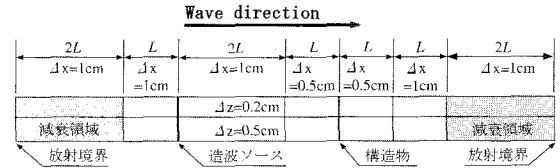


図-3 計算領域

件、底面境界は free slip 条件と設定した。造波方法は Stokes 波第5近似的造波ソースを適用し、移流項の差分スキームは DONOR-0.2を用いている。模型の構造諸元、入射波条件、水深は実験と同じものとした。

4. 結果と考察

(1) 位相平均場における流況特性

ここでは結果の一例として、ケース2,4 (周期 $T = 0.63$ s, 0.80 s) における計算および実験結果について示す。位相平均場における流況特性を解明するために、計算結果と実験結果から位相平均場における流速ベクトルおよび乱れエネルギーの空間分布を求め、両者を比較した。乱れエネルギー k は実験から得られた実流速 (u, v) と位相平均流速 $(\langle u \rangle, \langle v \rangle)$ より次式で定義した。

$$k = \frac{1}{2} \{ (u - \langle u \rangle)^2 + (v - \langle v \rangle)^2 \} \dots \dots \dots (1)$$

図-4 および図-5 に $T = 0.63$ s における位相 $t/T = 1/4$ および $3/4$ の計算結果と実験結果の位相平均流速 U (ベクトル) と乱れエネルギー k (コンター) の空間分布を示す。図の左側が沖側で、縦軸と横軸はそれぞれ水深 h で無次元化した水底からの高さ z/h とスリットからの距離 x/h を示し、全流速ベクトルは波速 c で無次元化している。なお、位相はスリット壁の沖側の水面位置が静水面を横切る時 (ゼロアップ時) を $t/T = 0$ とした。図-4、図-5 より、スリット近傍では各位相において計算と実験結果の両方でスリット噴流が見られる。スリット噴流は位相 $t/T = 1/4$ の時に沖方向に発生し、位相 $t/T = 3/4$ の時に岸方向へ転じている。図-4 について見ると、計算結果、実験結果ともに全体的に同様の流速パターンを示している。しかし、スリット内部および極近傍の流況について若干の差異が見られる。乱れエネルギーに関しては、両者ともにスリット内部から近傍にかけ

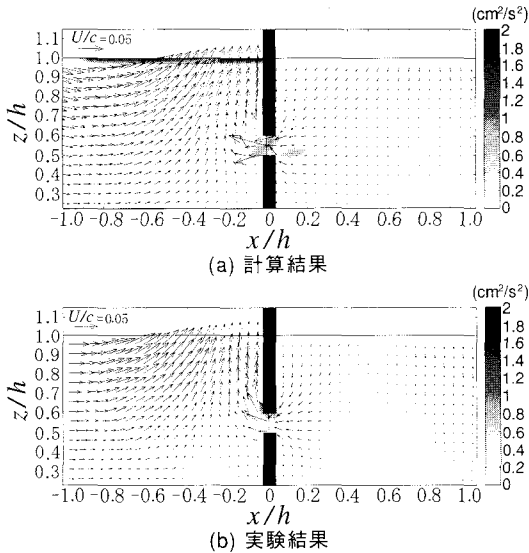


図-4 位相平均流速 U と乱れエネルギー k の空間分布
(位相: $t/T=1/4$; 入射波: $T=0.63$ s)

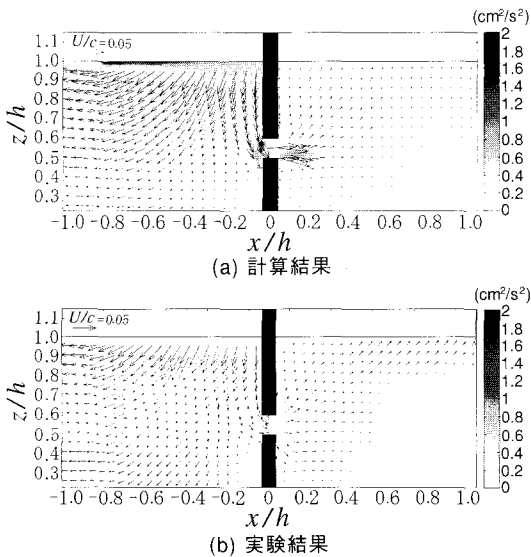


図-5 位相平均流速 U と乱れエネルギー k の空間分布
(位相: $t/T=3/4$; 入射波: $T=0.63$ s)

で乱れエネルギーが発生しているが、実験結果においてスリットの上方の隅角部周辺で乱れエネルギーのピークを示している点が計算結果と異なる。図-5では、図-4と同様に計算結果と実験結果の流速パターンの全体的な傾向は同じである。実験結果のスリット内部流速データが欠損しているが、極近傍の流速ベクトルおよび乱れエネルギーの発生状況から判断すると、計算結果の方が実験結果よりスリット内部で強い流速を示しているものと考えられる。

図-6に $T=0.63$ sの位相 $t/T=1/4$ における鉛直平板

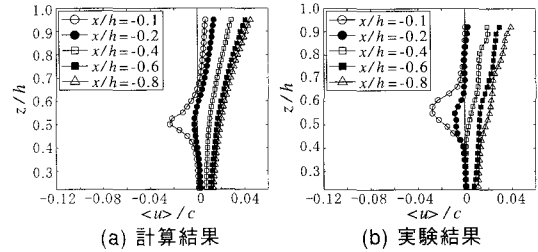


図-6 スリット沖側における位相平均流速 U の水平方向成分 $\langle u \rangle$ の鉛直分布 (位相: $t/T=1/4$; 入射波: $T=0.63$ s)

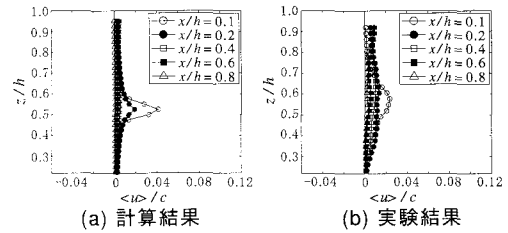


図-7 スリット岸側における位相平均流速 U の水平方向成分 $\langle u \rangle$ の鉛直分布 (位相: $t/T=3/4$; 入射波: $T=0.63$ s)

から沖側へ任意の距離離れた位置の位相平均流速の水平方向成分 $\langle u \rangle$ の鉛直分布を示す。流速は波速 c で無次元化している。縦軸は無次元水深 z/h を表し、横軸は位相平均流速 $\langle u \rangle / c$ で、正方向は岸向き、負方向は沖向きの流速を示す。スリット近傍 ($x/h = -0.1$) の $\langle u \rangle / c$ の鉛直分布に関しては、実験結果のスリット噴流は計算結果よりも広角に広がる傾向がある。しかしながら、スリット近傍を除けば、計算結果の流速の分布形状は実験結果とよく一致していると言える。

図-7に位相 $t/T=3/4$ における鉛直平板から岸側へ任意の距離離れた位置の流速 $\langle u \rangle / c$ の鉛直分布を示す。計算と実験結果の流速のピーク発生位置は同じであるが、計算結果のスリット噴流の流束幅が実験結果より狭くなっている。さらに、計算結果のスリット噴流のピーク値は実験結果よりも大きくなっている。

図-8および図-9に示すのは、図-4～図-7より入射波周期の長い $T=0.80$ sにおける位相 $t/T=1/4$ および $3/4$ の計算結果と実験結果の位相平均流速 U (ベクトル) と乱れエネルギー k (コンター) の空間分布を示す。図の諸元は入射波の周期以外は図-4および図-5と同じである。図-8(b)および図-9(b)のスリット近くの白色の部分は欠損データである。図-8より、位相 $t/T=1/4$ の時スリット沖側部分において計算結果のスリット噴流の主軸は水平方向であるのに対して、実験結果の噴流の主軸は水面方向へ偏流している。流速パターンと同様に、計算結果の乱れエネルギーは水平方向に分布しているのに対して、実験結果の乱れエネルギーはスリット上方に

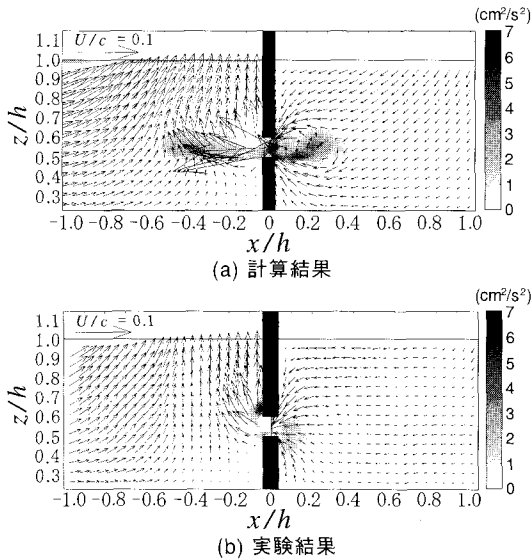


図-8 位相平均流速 U と乱れエネルギー k の空間分布 (位相: $t/T=1/4$; 入射波: $T=0.80$ s)

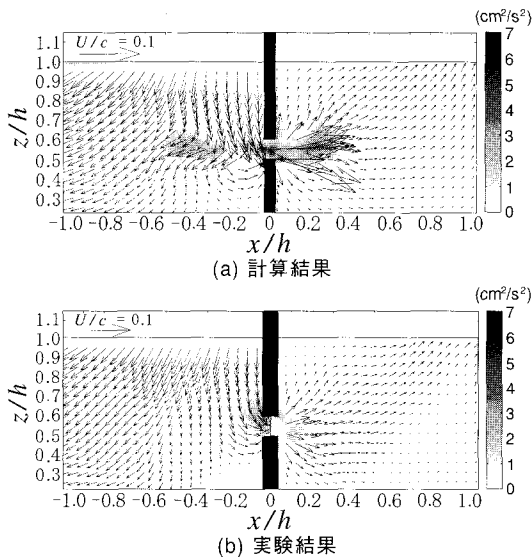


図-9 位相平均流速 U と乱れエネルギー k の空間分布 (位相: $t/T=3/4$; 入射波: $T=0.80$ s)

分布している。図-9 に示す位相 $t/T=3/4$ におけるスリット岸側部分においては計算結果と実験結果では異なった流況を示している。計算結果のスリット噴流の主軸は水平方向であるのに対して、実験結果の噴流の主軸は底面方向である。また、スリットの沖側、岸側の両方において、計算結果の乱れエネルギーは実験結果よりも広範囲に分布している。以上より、計算と実験結果の流速および乱れエネルギーのパターンは全体的に異なっていることがわかる。

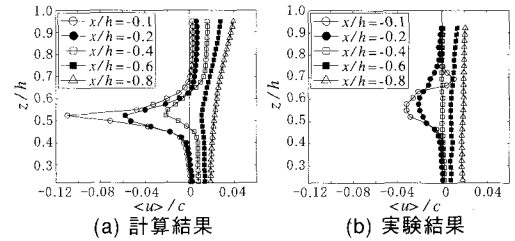


図-10 スリット沖側における位相平均流速 U の水平方向成分 $\langle u \rangle$ の鉛直分布 (位相: $t/T=1/4$; 入射波: $T=0.80$ s)

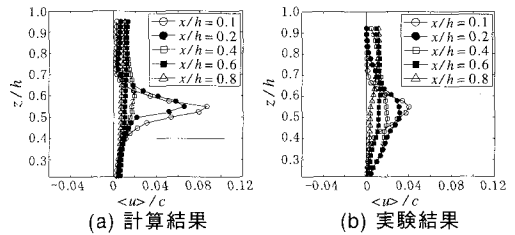


図-11 スリット岸側における位相平均流速 U の水平方向成分 $\langle u \rangle$ の鉛直分布 (位相: $t/T=3/4$; 入射波: $T=0.80$ s)

図-10 および図-11 に位相 $t/T=1/4$ および $3/4$ における鉛直平板から岸沖方向に任意の距離離れた位置の流速 $\langle u \rangle / c$ の鉛直分布を示す。図-6、図-7 で示した傾向と同様に、スリット近傍の流速に関して、計算結果は実験結果より大きく、ここでは3倍程度となっている。また、噴流の影響は $x/h = -0.4$ まで及んでいる。しかし、位相平均流速の水平方向成分の鉛直分布の形状は、スリットから十分離れた位置 ($|x/h| > 0.6$) では、沖側、岸側の両方でよく一致していることがわかる。

以上より、比較的周期の短い入射波に対しては数値計算は実験結果をうまく表現できているが、入射波周期が長くなるに従ってスリットの極近傍における数値計算の再現性が悪くなる。しかしながら、スリットからある程度離れた位置においては、数値計算の再現性は良好であると言える。

(2) スリット通過流量と入射波周期の関係

数値計算の精度を確認するために、計算結果と実験結果のスリットを通過する平均流量を比較した。流量は次式より、時間平均流速 U_i の水平方向成分 u_i を鉛直方向に積分して求めた。なお、計算および実験は2次元断面を対象としているため、流量は単位幅あたりの時間平均流量を用いた。

$$Q = \int_{-h}^0 u_i dz \quad (2)$$

図-12 に式 (2) で与えられたスリット通過流量 Q と入射波周期 T の関係を示す。横軸は入射波周期 T 、縦軸はスリットを通過する単位幅あたりの時間平均流量

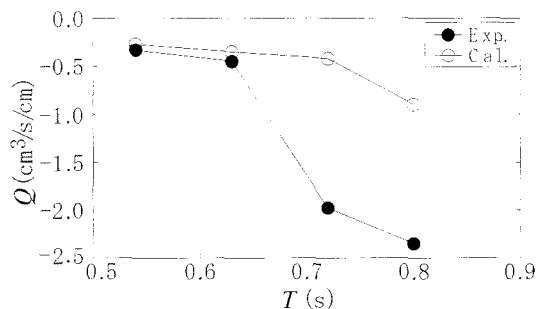


図-12 スリットを通過する単位幅あたりの時間平均流量 Q と入射波周期 T の関係

Q を表し、岸向きの流量を正とする。なお、流量はスリット噴流の影響が緩和し安定した流れが生じている位置 ($x/h = -0.8$) における流速分布から算定した。計算および実験結果ともに冲向きに弱い流れが発生していることがわかる。短周期の入射波 ($T = 0.54$ s および 0.63 s) では、計算と実験で得られた流量はほぼ一致し、数値計算による流量の定量的な算定は可能であると言える。しかし、入射波周期が長くなると ($T > 0.63$ s)、両者の差が大きくなり数値計算は過小評価となっている。計算および実験結果の流量の差は、位相平均流速のパターンやスリット噴流の位置、強さの違いによって生じていると考えられる。

5. 結 語

本研究では、水平スリット付鉛直平板を対象に Navier-Stokes 方程式を用いた数値計算と可視化実験を行い、スリット周辺の流速の時空間特性や乱れ特性を解明し、計算結果と実験結果の比較により、スリット周辺の流況に対する数値モデルの妥当性について検討した。以下に、本研究において確認された結果を示す。

1. 短周期の入射波に対して、計算および実験結果の

位相平均流速のパターンや流速の鉛直分布形状、乱れエネルギーの空間分布はよく一致し、数値計算は妥当な結果を示した。

2. 数値計算および実験結果の位相平均流速や乱れエネルギーの空間分布の差異は、入射波の周期が長くなるにつれて大きくなることがわかった。
3. スリットを通過する単位幅あたりの時間平均流量の比較より、短周期の入射波に対して、数値計算結果は実験結果とよく一致したが、周期が長くなると両者の差が大きくなり、数値計算は実験よりも過小な流量を与えることがわかった。

数値計算と実験結果の差の発生要因として、境界条件も含めた計算領域と実験水路の若干の相違や乱流モデルの適用限界が考えられる。今後、両者の差の発生要因の特定と乱流モデルの適用性について研究を進めていく予定である。

参 考 文 献

- (財)沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF), 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12.
- 折橋恒春・恩地正憲・山野貴司・角野昇八 (2004): 波動により平板スリット周辺に発生する一方向平均流とその誘起機構の解析, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 676-680.
- 中村孝幸・大村智宏・大井邦昭 (2003): 渦流制御を利用する海水交換促進型防波堤の効果について, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 806-810.
- 山本正昭・中泉昌光・間辺本文 (1987): 潜堤付防波堤による海水交流工法の開発, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 675-679.
- Lee, C. and D.S. Lee (2003): Water surface resonance in the L-shaped channel of seawater exchange breakwater, Ocean Engineering, vol.30 No.18, pp. 2423-2436.
- Mori, N. and K.A. Chang (2003): Introduction to mpiv, <http://sauron.urban.eng.osaka-cu.ac.jp/mori/software/mpiv/>.
- Orihashi, T., S. Kakuno, H. Kashima and N. Mori (2005) Current and Vortex Characteristic Induced by Vertical Thin Wall with Horizontal Slit, Proceedings of APAC2005, in press.